



พฤติกรรมการถ่ายแรงลงบนเสาเข็มบ้านแบบผนังรับน้ำหนักชนิดแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ

LOAD ON PILES FOR PRECAST CONCRETE BEARING WALL STRUCTURE

จูลศักดิ์ ทำเนา<sup>1</sup> ดร.พิสิทธิ์ ชันตีวัฒนกุล<sup>2</sup> ดร.เกียรติศักดิ์ สหะศักดิ์มนตรี<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์โทภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, (khunjulasak@gmail.com)

<sup>2</sup>อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, (drpisitk@yahoo.com)

<sup>3</sup>อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, (kiert\_s@yahoo.com)

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงลงเสาเข็มของ โครงสร้างอาคารที่ใช้ผนังรับน้ำหนักชนิดแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบแบบสถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น บทความฉบับนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาผลกระทบของความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของจุดเชื่อมต่อของผนัง ต่อแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มและผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งเกร็งของผนังหล่อสำเร็จกับผนังหล่อในที่ การศึกษาพบว่า ความแข็งเกร็งของจุดเชื่อมต่อมีผลต่อแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มเฉพาะในกรณีที่มีผนังที่มีความยาวมาก แต่มีผลน้อยมากในกรณีผนังสั้น การศึกษายังพบว่าความแข็งเกร็งของผนังยาวหล่อในที่ มีค่าสูงกว่าของผนังหล่อสำเร็จ ความแตกต่างนี้ยังขึ้นอยู่กับการยุบตัวของเสาเข็ม โดยจะมีค่าสูงขึ้นตามการยุบตัวของเสาเข็ม

**คำสำคัญ:** ผนังรับน้ำหนัก, ผนังรับน้ำหนักชนิดแผ่นหล่อสำเร็จ, ความแข็งเกร็งของผนัง

### ABSTRACT

This article presents results of a study on load distribution on pile foundations of precast concrete structure. In this study, loads on pile foundations for precast concrete walls were analyzed using a non-linear finite elements program. Two topics were covered in this study: one was the effects of connection stiffness on pile load distribution, and the other was the comparison of stiffness of precast wall to that of cast-in-place wall. Results of the study showed that connection stiffness has significant effects for long wall only, whereas for short wall the effects were not significant. Results of the study also showed that the overall stiffness of long cast-in-place wall was higher than that of precast wall. The difference between wall stiffness increased with decreasing pile stiffness.

**Keywords:** Load bearing wall, Precast load bearing wall, Wall stiffness



## 1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำโครงสร้างผนังรับน้ำหนักแบบหล่อสำเร็จมาใช้ในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยมากขึ้นเป็นที่ทราบกันดีว่าในการคำนวณแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มของโครงสร้างระบบนี้ ไม่สามารถใช่วิธีแบ่งพื้นที่รับน้ำหนักเหมือนกับโครงสร้างระบบเสา-คานได้ (สุริยา, 2551) โดยทั่วไปมักจะทำการวิเคราะห์แรงที่ถ่ายลงสู่ฐานรากเสาเข็ม โดยจำลองให้ผนังทั้งหมดเป็นโครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง ทำให้น้ำหนักที่กระจายลงสู่ฐานรากค่อนข้างสม่ำเสมอ เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งเกร็ง (Stiffness) ค่อนข้างสูง วิธีการนี้เหมาะกับผนังระบบหล่อในที่ ซึ่งผนังเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมักนำวิธีการวิเคราะห์ลักษณะนี้มาใช้กับโครงสร้างระบบผนังหล่อสำเร็จที่มีจุดเชื่อมต่อเป็นจำนวนมากด้วย ซึ่งผลกระทบของจุดเชื่อมต่อ ต่อค่าความแข็งเกร็ง ของโครงสร้างยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน ทำให้เกิดข้อสงสัยว่าผลกระทบของจุดเชื่อมต่อจะทำให้ความแข็งเกร็งของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจนมีผลกระทบต่อน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มของ โครงสร้างแบบผนังรับน้ำหนักชนิดหล่อสำเร็จ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบบ้านพักอาศัยรูปแบบนี้อย่างเหมาะสมต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มของ โครงสร้างบ้านแบบผนังหล่อสำเร็จ (PC wall) เทียบกับ โครงสร้างบ้านแบบผนังหล่อในที่ (RC wall) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง
2. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อ ต่อแรงที่ถ่ายลงสู่ฐานรากเสาเข็ม
3. เพื่อหาแนวทางการวิเคราะห์แรงที่ถ่ายลงสู่ฐานรากเสาเข็มของ โครงสร้างแบบผนังหล่อสำเร็จ ที่เหมาะสม สำหรับใช้ในทางปฏิบัติ

## 3. การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายแรงลงเสาเข็มที่ผ่านมา

สุริยา ฤทธิจิตเพียร (2551) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของ โครงสร้างบ้านแบบผนังรับน้ำหนัก ทั้งการถ่ายน้ำหนักลงเสาเข็มรวมถึงการทรุดตัวของเสาเข็ม และการออกแบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อรับแรงที่เกิดขึ้นในผนัง โดยการศึกษาใช้บ้านแฝด 2 ชั้น ที่มีโครงสร้างเป็นผนังรับน้ำหนักชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก และมีฐานรากเป็นเสาเข็ม ที่อยู่ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เป็นกรณีศึกษา โดยการศึกษาครั้งนี้ครอบคลุมประเด็นต่างๆ รวมถึงผลของขนาดความแข็งของเสาเข็ม การแบกทานจากดินที่อยู่ใต้อาคารร่วมกับเสาเข็ม ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มกลุ่ม และผลของความแปรปรวนของเสาเข็ม ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหลัก

Warmitchai, P., (2009) ได้ทำการทดสอบการรับแรงของจุดเชื่อมต่อของ โครงสร้างระบบผนังหล่อสำเร็จ โดยทำแบบจำลองของผนังแบบย่อส่วน เพื่อทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อภายใต้แรงกระทำแบบ Cyclic load และจากการทดลอง ได้กำหนดแบบจำลองการเชื่อมต่อต่างๆระหว่างชิ้นส่วน โครงสร้างด้วย Multi Linear Elastic Link element เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000

## 4. ขั้นตอนการศึกษา

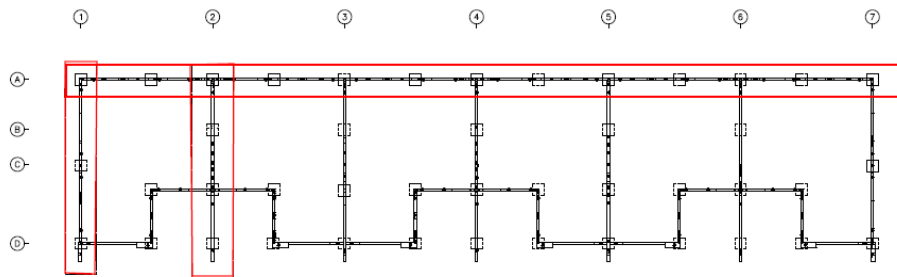
การศึกษานี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) แบบสถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Static Nonlinear Analysis) ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งเป็นแบบจำลองสามมิติ รายงานนี้นำเสนอผลการศึกษาเบื้องต้นที่ใช้



แบบจำลองแบบสองมิติ ศึกษาพฤติกรรมของผนังแต่ละด้านของโครงสร้างแบบแยกส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจถึงผลกระทบของจุดเชื่อมต่อต่างๆ ต่อพฤติกรรมของการถ่ายแรงสู่เสาเข็ม หลังจากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์แบบสามมิติต่อไป รายละเอียดของการศึกษามีดังต่อไปนี้

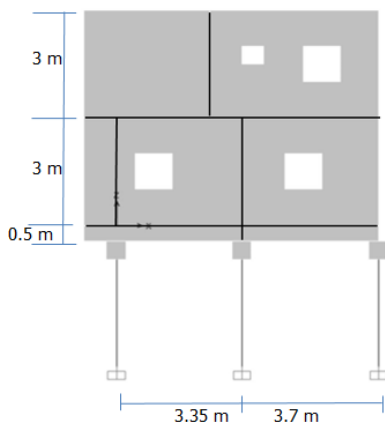
#### 4.1. แบบบ้านที่ใช้ในการศึกษา

แบบบ้านที่ใช้ในการศึกษา คือ บ้านทาวน์เฮ้าส์ 2 ชั้น 6 ห้อง ระบบผนังรับน้ำหนักแบบหล่อสำเร็จมีการจัดวางแนวผนังและเสาเข็ม ดังรูปที่ 1

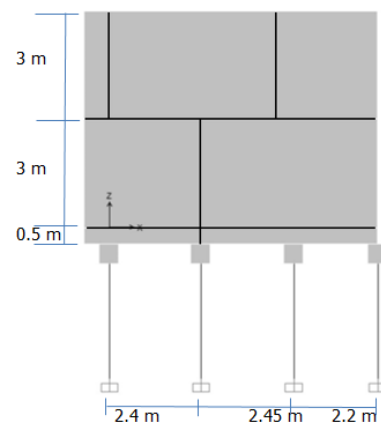


รูปที่ 1. ผังแสดงแนวผนังและเสาเข็มของระบบโครงสร้างบ้านแบบผนังรับน้ำหนักที่ใช้ในการศึกษา

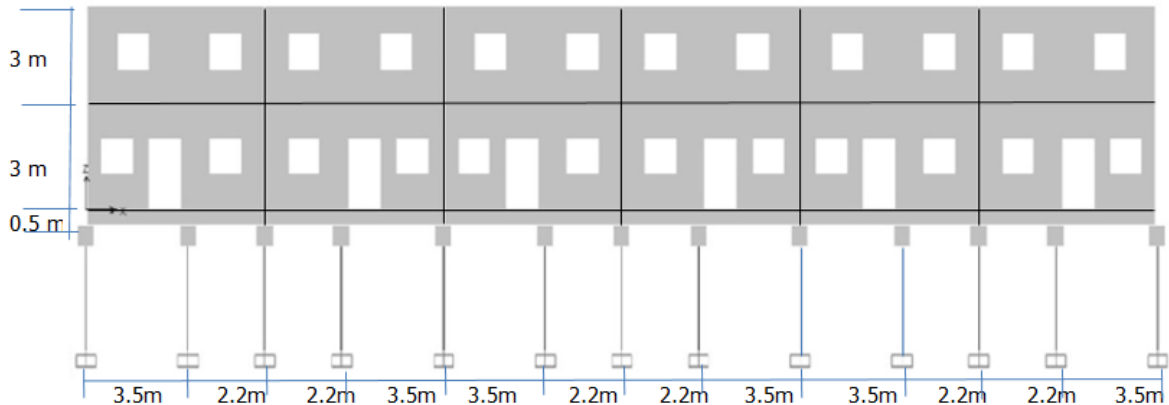
ในการศึกษานี้ได้เลือกพิจารณาเฉพาะผนังหลักที่แตกต่างกัน 3 แนว ที่มีความต่อเนื่องจากชั้นหนึ่งถึงชั้นสอง ซึ่งประกอบด้วยผนังด้านหลัง Line A, ผนังริม Line 1,7 และผนังกลาง Line 2-6 ส่วนผนังอื่นเป็นผนังที่ไม่มีต่อเนื่องและเป็นผนังสั้น รูปที่ 2 ถึง 4 แสดงรายละเอียดขนาดและลักษณะการจัดวางของผนังทั้งสามแนว



รูปที่ 2 แบบจำลองผนังสั้นด้านริม Grid Line 1 และ 7



รูปที่ 3 .แบบจำลองผนังสั้นกลางแนว Grid Line 2 ถึง 6



รูปที่ 4. แบบจำลองผนังยาวด้านหลัง Grid Line A

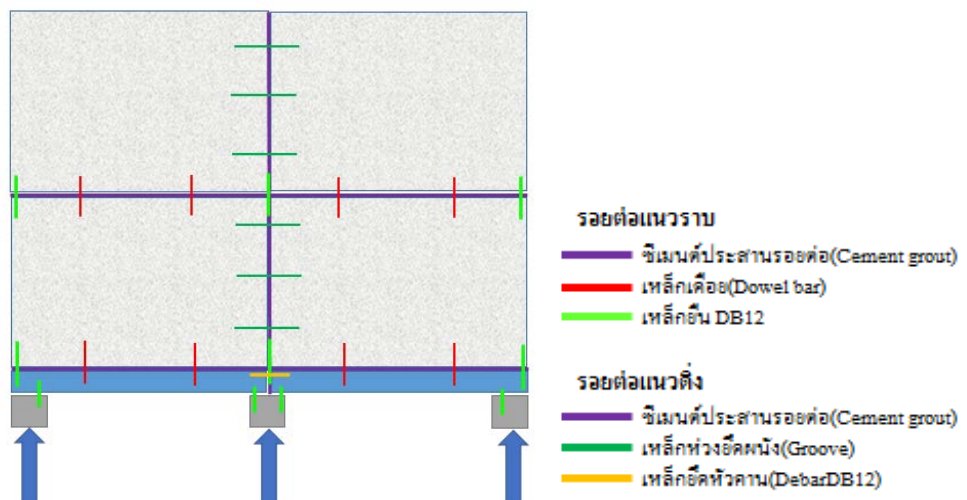
ผนังทุกด้านเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กมีความหนาเท่ากับ 10 เซนติเมตร รองรับที่ชั้นล่างสุดด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 20 X 40 เซนติเมตร ด้านใต้คานเป็นฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 50 X 50 เซนติเมตร หนา 50 เซนติเมตร ซึ่งรองรับด้วยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอขนาด 22 เซนติเมตร ยาว 24 เมตร

#### 4.2 การจำลองโครงสร้าง

ในการศึกษานี้เสาเข็มถูกจำลองด้วย Frame Element ฐานราก พื้น ผนัง และ คานถูกจำลองด้วย Shell Element จุดเชื่อมต่อถูกจำลองด้วย Nonlinear Link Element

#### 4.3 การจำลองจุดเชื่อมต่อ

รูปที่ 5 แสดงรูปแบบของจุดเชื่อมต่อแนวราบและจุดเชื่อมต่อแนวตั้งของโครงสร้างที่ใช้ศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



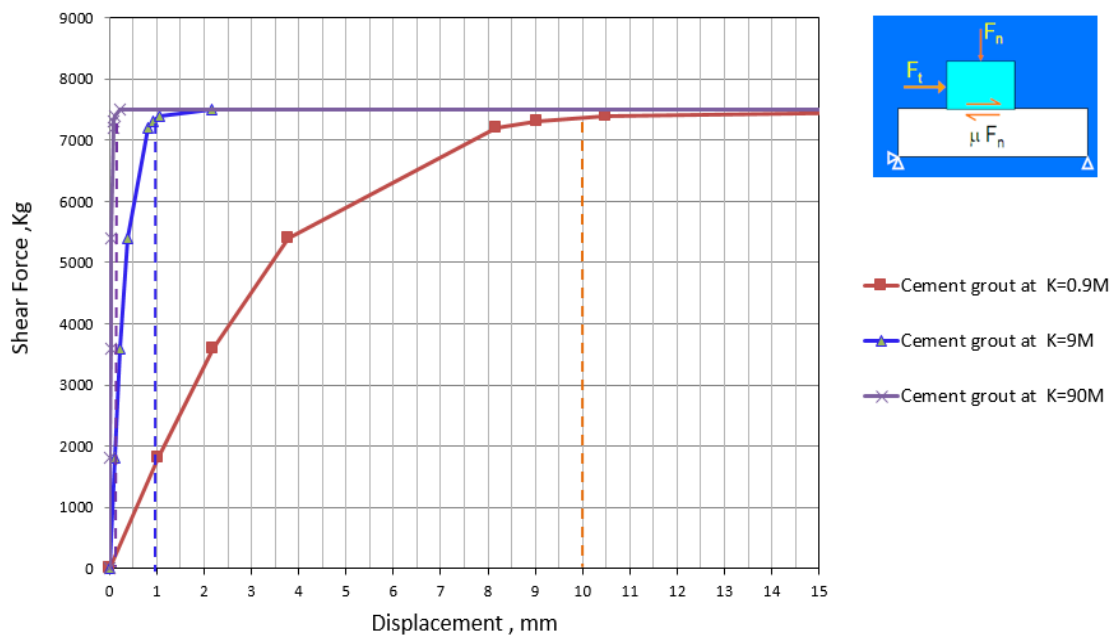
รูปที่ 5. รูปแบบและตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ



#### 4.3.1 จุดเชื่อมต่อแนวราบ

จุดเชื่อมต่อแนวราบประกอบด้วย Cement grout, Dowel Bar , เหล็กยื่นซีตริงผนัง DB 12 บริเวณจุดเชื่อมต่อและเหล็กเดือย DB12 ชีตฐานรากกับคาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**Cement grout** สมมุติให้เป็น Link element แบบ Friction Isolation ซึ่งสามารถรับแรงอัดในแนวแกน และแรงในแนวขนานกับจุดเชื่อมต่อสองทิศทาง โดยสติเฟนสของ Link element ในแนวแกนได้ใช้ค่าเท่ากับค่าที่ใช้ในการศึกษาของ Wamitchai, P., (2009) ส่วนแรงในแนวขนานเกิดจากแรงเสียดทาน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $\mu$ ) สำหรับคอนกรีตผิวเรียบใช้เท่ากับ 0.5 ที่แนะนำโดย CEB-FIB MC2010 และโดยค่าสติเฟนสในแนวขนานของ Link element ถูกปรับจนได้ค่าการเคลื่อนที่ขณะเริ่มเลื่อนไถลมีค่าเท่ากับ 1 มม. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองของคอนกรีตผิวเรียบ (Mohamad et. al., 2015) อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเริ่มเลื่อนไถลยังไม่มีค่านั่น การศึกษานี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนที่ตัวที่จุดเลื่อนไถลมีค่ามากและน้อยกว่า 10 เท่าด้วย เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระยะเลื่อนไถลต่อพฤติกรรมของผนัง รูปที่ 6. แสดงกราฟระหว่างแรงเนื่องกับการเคลื่อนตัวของ Link element ที่ใช้ กรณีที่แรงอัดบนผิวสัมผัสเท่ากับ 15 ตัน.



รูปที่ 6 กราฟระหว่างแรงเนื่องกับการเคลื่อนตัวของ Link element ตัวแทน Cement grout

**Dowel Bar** ใช้แบบจำลองเดียวกันกับ Wamitchai (2009) โดยใช้ Link element แบบ Multi-linear elastic ที่สามารถรับแรงอัดและแรงดึงในแนวแกนเท่านั้น ไม่สามารถรับแรงในแนวราบได้เนื่องจากบริเวณที่ Dowel bar ติดตั้งผนังกับพื้นจะเกิดการแยกตัวไม่สัมผัสกัน ทำให้ไม่สามารถรับแรงเนื่องที่เกิดจาก Shear friction ได้ ดังนั้นจึงสมมุติให้ Dowel bar ไม่สามารถรับแรงในแนวราบที่ขนานกับแนวแกนได้



เหล็กยี่สิบ DB12 จำลองโดยใช้ Link element แบบ Multi-linear elastic ที่สามารถรับแรงอัดและแรงดึงในแนวแกน เหมือนกับของเหล็ก Dowel Bar. ส่วนในแนวราบสมมุติให้สามารถรับแรงเฉือนจาก Shear friction ที่เกิดจาก Camping force จากแรงกดของน้ำหนักส่วนบน โดยแรงเฉือนสูงสุด (S max) คำนวณจาก

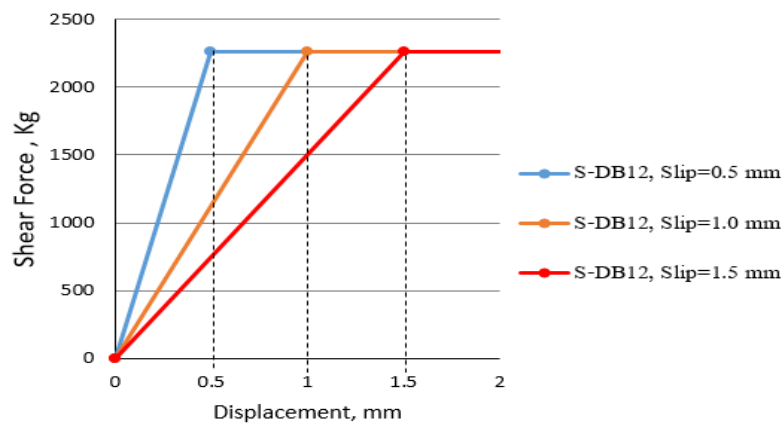
$$S_{max} = \mu A_s f_y$$

เมื่อ  $\mu$  คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน = 0.5,

$A_s$  คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก DB 12

และ  $f_y$  คือกำลังที่จุดครากของเหล็ก = 4000 kg/cm<sup>2</sup>

ระยะที่จุดเลื่อนไถลสมมุติให้เท่ากับ 1 มม. นอกจากนี้ในการศึกษาขังได้วิเคราะห์ กรณีที่ระยะเลื่อนไถลที่ระยะ 0.5 และ 1.5 มม. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระยะเลื่อนไถลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างอีกด้วย รูปที่ 7 แสดงกราฟระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวของ Link element ที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 7 กราฟแสดงแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเหล็กยี่สิบ DB12

#### 4.3.2 จุดเชื่อมต่อแนวตั้ง

จุดเชื่อมต่อแนวตั้งประกอบด้วย Cement grout และ Groove ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ Link element เหมือนกับที่แนะนำโดย Warnitchai (2009) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**Cement grout** จำลองโดยใช้ Link element แบบ Multi-linear elastic ซึ่งสามารถรับได้เฉพาะแรงอัดในแนวแกน ไม่สามารถรับแรงในแนวขนานกับรอยต่อได้ โดยค่าที่ใช้เหมือนกับรอยต่อในแนวราบตามรูปที่ 6

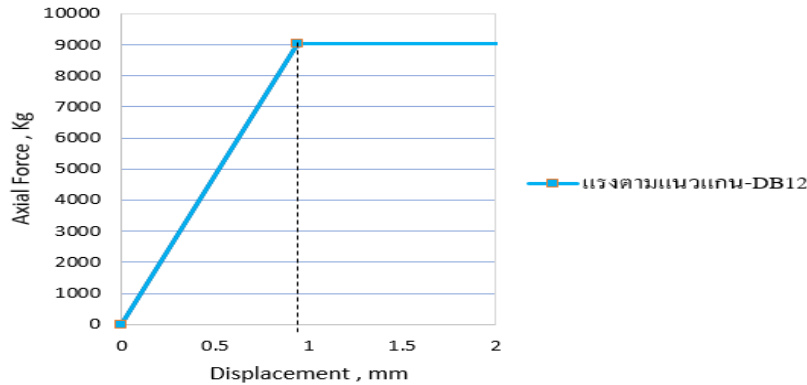
**Groove** เหล็กห้วงยึดผนังจำลองโดยใช้ Link element แบบ Multi-linear elastic ที่รับแรงในแนวขนานรอยต่อได้เท่านั้น ไม่สามารถรับแรงในแนวแกนได้ โดยคุณสมบัติของ Link element ได้ใช้ค่าจากการทดสอบของ Warnitchai (2009)





#### 4.3.3 เหล็กยึดหัวคาน Ground Beam

เหล็กยึดหัวคาน Ground Beam เป็นเหล็ก DB 12 สองเส้น ซึ่งจำลองด้วย Link element แบบ Multi-linear elastic ดังแสดงในรูปที่ 8. โดยคำนวณแรงสูงสุดจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก DB12 สองเส้นคูณด้วยกำลังที่จุดคราก ที่  $4000 \text{ kg/cm}^2$  ระยะยึดที่จุดครากคำนวณ โดยใช้ Young's Modulus ของเหล็ก และระยะ Development length ของเหล็กที่ 48 ซม. (40 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็ก)



รูปที่ 8. กราฟระหว่างแรงดึงกับการเคลื่อนตัวของ Link ที่ใช้แทน เหล็กDB12 ยึดหัวคาน

#### 4.3.4 บทบาทของจุดเชื่อมต่อต่างๆต่อพฤติกรรมของผนังหล่อสำเร็จ

ในกรณีที่ผนังมีการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์ แรงกระจายลงสู่ฐานรากมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้แรงปฏิกิริยาจากเสาเข็มทุกต้นมีขนาดเกือบเท่ากัน และทำให้เกิดโมเมนต์คดในผนัง ส่งผลให้เกิดแรงอัดที่ด้านบนของผนังชั้นสอง แต่เนื่องจากจุดเชื่อมต่อแนวตั้งของผนังไม่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงที่จะทำให้แผ่นผนังเกิดความสมดุลของแรงในแนวราบได้ ดังนั้นแรงเฉือนในแนวอนที่ ณ จุดเชื่อมต่อแนวราบ ทั้งชั้นหนึ่งและชั้นสองจึงต้องมีขนาดเท่ากับแรงอัดที่เกิดขึ้นเพื่อรักษาสมาดุลของแรงในแนวราบของแผ่นผนัง จึงเห็นได้ว่าแรงเฉือน ณ จุดเชื่อมต่อแนวราบเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้การถ่ายแรงกระจายลงสู่ฐานรากสม่ำเสมอหรือไม่ แรงเฉือนในแนวขนานกับรอยต่อแนวราบจะถูกรองรับโดย 1) แรงเสียดทานจากน้ำหนักกดของผนัง และ 2) แรงเฉือน Shear Friction ที่เกิดจาก Clamping force ของเหล็กยึด DB 12

#### 4.4 การจำลองเสาเข็ม

ในการศึกษานี้ใช้การจำลองเสาเข็มโดยใช้วิธี Cantilever Idealization (Fleming et. al., 2009) ซึ่งจำลองเสาเข็มเป็นคานยื่นที่มีจุดยึดที่ด้านบนได้ของคาน โดยกำหนดความยาวของคานยื่นจะให้ได้ระยะ โคงค์ตัวด้านข้างเทียบเท่ากับระยะ โคงค์ของเสาเข็มจริงเมื่อมีแรงกระทำด้านข้างเท่ากัน ส่วนการยุบตัวของเสาเข็มแนวตั้งได้ถูกปรับให้มีค่าเท่ากับ  $5000 \text{ t/m}$  ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของเสาเข็มเดี่ยวยาว 20-25 m ที่ตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ แต่เนื่องจากพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มค่าการยุบตัวมีแนวโน้มจะสูงกว่านี้ ดังนั้นการศึกษาจึงวิเคราะห์ครอบคลุมกรณีที่มีการยุบตัวเท่ากับ 2500 และ 1000 t/m ที่เสาเข็มด้วย



#### 4.5 การศึกษาผลของสตีเฟนของจุดเชื่อมต่อ

การศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

##### 4.5.1 การศึกษาผลของสตีเฟนของจุดเชื่อมต่อ ต่อแรงที่ถ่ายลงเสาเข็ม

การศึกษาส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเคลื่อนตัวขณะเลื่อนไถลต่อแรงที่ถ่ายลงเสาเข็ม โดยการศึกษาแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ

- 1) กรณีที่แรงเฉือนในจุดเชื่อมต่อแนวราบเกิดจากแรงเสียดทานของ Cement grout เท่านั้น การศึกษาในส่วนนี้ได้ทำการวิเคราะห์แรงในเสาเข็มกรณีที่มีการเลื่อนไถลของแรงเสียดทานเกิดขึ้นที่ระยะ 0.1, 1.0 และ 10 มม.
- 2) กรณีที่แรงเฉือนในจุดเชื่อมต่อแนวราบเกิดจาก Shear Friction ของเหล็กขึ้น DB 12 เท่านั้น กรณีนี้เป็นกรณีที่แนะนำโดย ACI 318-11 ซึ่งแนะนำภายใต้หัวข้อ 16.5 Structural integrity ว่าไม่ควรออกแบบให้กำลังรับแรงเฉือนของจุดเชื่อมต่อขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานจากน้ำหนักที่กดลงบนจุดเชื่อมต่อ ซึ่งอาจจะสูญเสียไปในกรณีที่มีการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างบางชิ้น และอาจนำไปสู่ Progressive Failure ได้ การวิเคราะห์ในกรณีนี้ครอบคลุมกรณีที่มีการเลื่อนไถลเกิดขึ้นที่ระยะ 0.5, 1.0 และ 1.5 มม.

โดยทำการเปรียบเทียบแรงที่ถ่ายลงเสาเข็มทั้ง 2 กรณี กับแรงที่ถ่ายในเสาเข็มของผนังแบบหล่อในที่

##### 4.5.2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบ สตีเฟนของผนังหล่อในที่และผนังหล่อสำเร็จ

เนื่องจากผนังหล่อสำเร็จจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อ การที่มีรอยต่อจำนวนมากอาจทำให้ผนังหล่อสำเร็จไม่สมบูรณ์เหมือนผนังหล่อในที่ซึ่งผนังถูกหล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นสตีเฟนของผนังหล่อสำเร็จจึงน่าจะมีค่าต่ำกว่าของผนังหล่อในที่ การศึกษาส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบว่าค่าสตีเฟนของผนังหล่อสำเร็จต่ำกว่าค่าสตีเฟนของผนังหล่อในที่เพียงใด โดยในการศึกษาจะทำการปรับลดค่าสตีเฟนของผนังหล่อในที่ลงจนกระทั่งแรงที่ถ่ายลงเสาเข็มมีขนาดใกล้เคียงของผนังหล่อสำเร็จ เนื่องจากการศึกษาใช้การวิเคราะห์แบบ Non-linear ขนาดการยุบตัวของเสาเข็มจึงอาจมีผลต่อค่าสตีเฟนของผนังโดยรวม ดังนั้นในการศึกษาจึงวิเคราะห์ครอบคลุมค่าการยุบตัวของเสาเข็ม 5000, 2500 และ 1000  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นช่วงที่เป็นไปได้สำหรับเสาเข็มในชั้นดินอ่อนกรุงเทพฯ ในการวิเคราะห์สมมุติให้แรงเฉือนของรอยต่อแนวราบเกิดจาก Shear Friction ของเหล็กขึ้น DB 12 เท่านั้น โดยไม่คิดแรงเสียดทานใน Cement grout ซึ่งสอดคล้องกับที่แนะนำโดย ACI 318-11 ภายใต้หัวข้อ 16.5 Structural integrity ในการวิเคราะห์กำหนดให้การเลื่อนไถลเกิดขึ้นที่ระยะ 1.0 มม. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองของคอนกรีตผิวเรียบ (Mohamad et. al., 2015)

#### 5. ผลการศึกษา

##### 5.1. ผลการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของจุดเชื่อมต่อ ต่อแรงที่ถ่ายลงสู่ฐานรากเสาเข็ม

ตารางที่ 1 และ 2 แสดงผลการวิเคราะห์แรงบนเสาเข็มของผนังริม (Line 1 และ 7) และ ผนังกลาง (Line 2 ถึง 6) ตามลำดับ จากตารางดังกล่าวจะเห็นว่า สำหรับผนังริมและผนังกลาง ซึ่งเป็นผนังสั้น ค่าแรงที่ถ่ายลงเสาเข็มของผนังแบบหล่อสำเร็จ ค่อนข้างใกล้เคียงกับแรงในเสาเข็มของผนังหล่อในที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีแรงเสียดทานของ





Cement grout ความแตกต่างของแรงในเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จและผนังหล่อในที่ มีค่าไม่เกิน 2% ส่วนกรณีที่แรงเฉือนเกิดจาก Shear friction ของเหล็กชั้น DB12 ความแตกต่างของแรงจะไม่เกินประมาณ 3% ทั้งนี้ระยะการเคลื่อนตัวขณะเลื่อนไถลมีผลกระทบต่อแรงในเสาเข็มเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ของผนังด้านหลัง (Line A) ซึ่งเป็นผนังที่ค่อนข้างยาว จะเห็นว่าความแตกต่างของแรงในเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จกับผนังหล่อในที่ จะมีขนาดสูงกว่าของผนังริมและผนังกลาง โดยกรณีที่มียุทธศาสตร์ของ Cement grout ความแตกต่างของแรงในเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จและผนังหล่อในที่ มีค่าไม่เกิน 8% ส่วนกรณีที่แรงเฉือนเกิดจาก Shear friction ของเหล็กชั้น DB12 ความแตกต่างของแรงจะไม่เกินประมาณ 13 % ทั้งนี้ขนาดของความแตกต่างจะสูงขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวขณะเลื่อนไถล

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์แรงลงเสาเข็มของผนังริม (Line 1 และ 7)

กรณี	รายละเอียด	แรงที่ถ่ายลงเสาเข็ม (ตัน)		
		1 / D	1 / C	1 / A
		7 / D	7 / C	7 / A
RC	ผนังหล่อในที่ที่มีความต่อเนื่อง	17.82	16.00	12.78
PC	ผนังหล่อสำเร็จ คัดแรงเฉือนจากแรงเสียดทานของ Cement grout			
	ระยะเลื่อนไถล 10 มม.	17.56	16.51	12.54
	% ความแตกต่าง	-1.49%	3.14%	-1.85%
	ระยะเลื่อนไถล 1 มม.	17.75	16.15	12.71
	% ความแตกต่าง	-0.44%	0.90%	-0.52%
PC	ผนังหล่อสำเร็จ คัดแรงเฉือนจาก Shear friction จากเหล็กชั้น DB12			
	ระยะเลื่อนไถล 0.5 มม.	17.45	16.71	12.45
	% ความแตกต่าง	-2.10%	4.42%	-2.61%
	ระยะเลื่อนไถล 1 มม.	17.29	17.01	12.30
	% ความแตกต่าง	-2.98%	6.32%	-3.75%
PC	ระยะเลื่อนไถล 1.5 มม.	17.18	17.22	12.20
	% ความแตกต่าง	-3.60%	7.63%	-4.54%



ตารางที่ 2. ผลการวิเคราะห์แรงลงเสาเข็มของผนังกลาง (Line 2-6)

กรณี	รายละเอียด	แรงที่ถ่ายลงเสาเข็ม (ตัน)			
		1-6 / D	1-6 / C	1-6 / B	1-6 / A
RC	ผนังหล่อในที่ที่มีความต่อเนื่อง	19.82	18.01	15.91	13.15
PC	ผนังหล่อสำเร็จคิดแรงเฉือนจากแรงเสียดทานของ Cement grout				
	ระยะเลื่อนไถล 10 มม.	19.56	18.27	16.18	12.88
	% ความแตกต่าง	-1.30%	1.44%	1.68%	-2.06%
	ระยะเลื่อนไถล 1 มม.	19.73	18.08	16.04	13.04
	% ความแตกต่าง	-0.45%	0.40%	0.81%	-0.85%
	ระยะเลื่อนไถล 0.10 มม.	19.78	18.03	15.97	13.10
	% ความแตกต่าง	-0.19%	0.14%	0.39%	-0.38%
PC	ผนังหล่อสำเร็จคิดแรงเฉือนจาก Shear friction จากเหล็กชั้น DB12				
	ระยะเลื่อนไถล 0.5 มม.	19.48	18.38	16.20	12.82
	% ความแตกต่าง	-1.70%	2.07%	1.79%	-2.45%
	ระยะเลื่อนไถล 1 มม.	19.38	18.50	16.26	12.74
	% ความแตกต่าง	-2.19%	2.74%	2.16%	-3.07%
	ระยะเลื่อนไถล 1.5 มม.	19.33	18.57	16.29	12.70
	% ความแตกต่าง	-2.46%	3.11%	2.36%	-3.41%

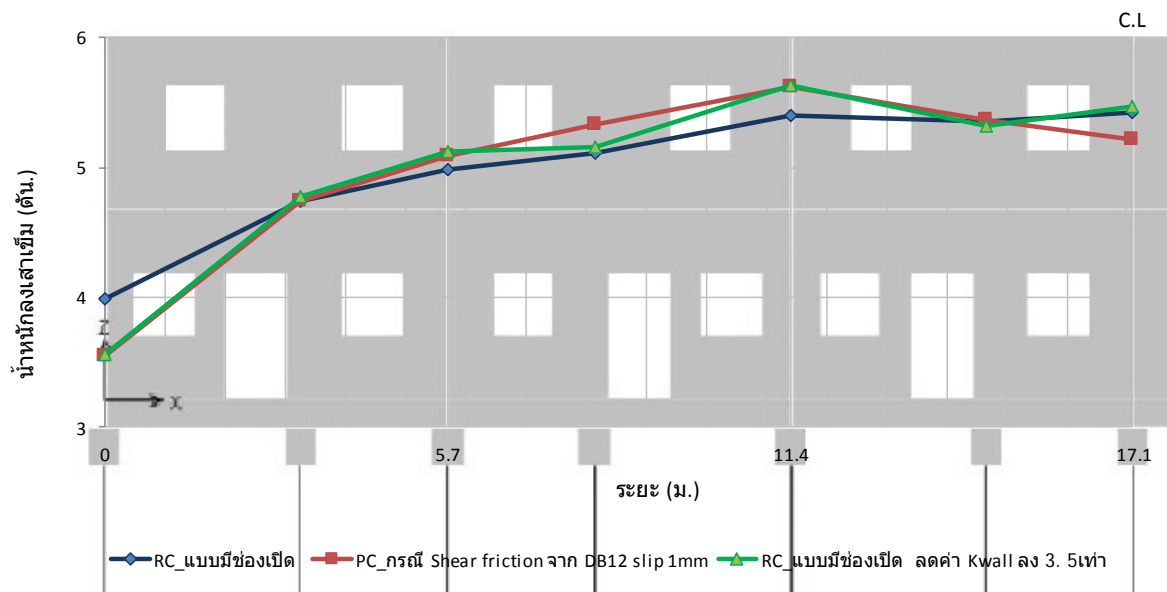
ตารางที่ 3. ผลการวิเคราะห์แรงลงเสาเข็มของผนังด้านหลัง Line A

กรณี	รายละเอียด	แรงที่ถ่ายลงเสาเข็ม (ตัน)						
		1 / A	1.1 / A	2 / A	2.1 / A	3 / A	3.1 / A	4 / A
		7 / A	7.1 / A	6 / A	6.1 / A	5 / A	5.1 / A	
RC	ผนังหล่อในที่ที่มีความต่อเนื่อง	3.97	4.74	4.99	5.12	5.41	5.36	5.43
PC	ผนังหล่อสำเร็จคิดแรงเฉือนจากแรงเสียดทานของ Cement grout							
	ระยะเลื่อนไถล 10 มม.	3.67	4.76	5.05	5.25	5.49	5.39	5.39
	% ความแตกต่าง	-7.42%	0.50%	1.09%	2.50%	1.48%	0.55%	-0.78%
	ระยะเลื่อนไถล 1 มม.	3.82	4.71	5.01	5.18	5.45	5.39	5.44
	% ความแตกต่าง	-3.68%	-0.48%	0.40%	1.32%	0.82%	0.62%	0.13%
	ระยะเลื่อนไถล 0.1 มม.	3.88	4.71	5.00	5.17	5.43	5.39	5.45
	% ความแตกต่าง	-2.28%	-0.56%	0.12%	1.01%	0.37%	0.59%	0.28%
PC	ผนังหล่อสำเร็จคิดแรงเฉือนจาก Shear friction จากเหล็กชั้น DB12							
	ระยะเลื่อนไถล 0.5 มม.	3.61	4.74	5.07	5.29	5.57	5.37	5.28
	% ความแตกต่าง	-8.99%	0.20%	1.49%	3.46%	3.07%	0.13%	-2.84%
	ระยะเลื่อนไถล 1 มม.	3.53	4.75	5.09	5.34	5.62	5.36	5.21
	% ความแตกต่าง	-10.93%	0.31%	2.01%	4.26%	3.89%	-0.02%	-3.99%
	ระยะเลื่อนไถล 1.5 มม.	3.49	4.75	5.11	5.36	5.66	5.35	5.16
	% ความแตกต่าง	-12.09%	0.30%	2.28%	4.74%	4.62%	-0.15%	-4.90%

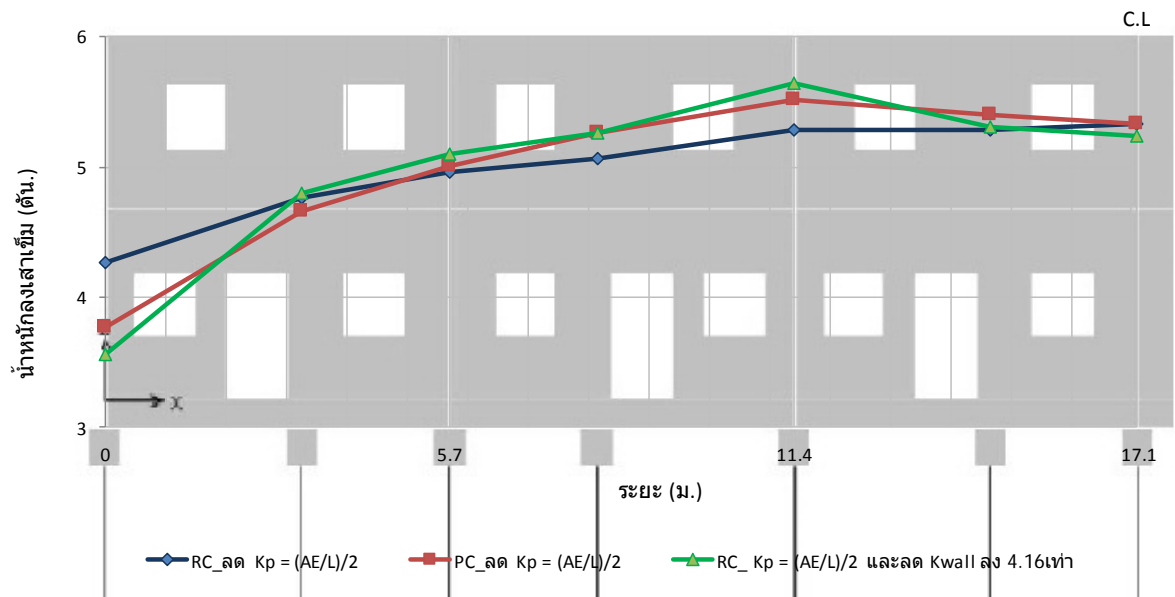


## 5.2 ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบ สติฟเนสของผนังหล่อในที่และผนังหล่อสำเร็จ

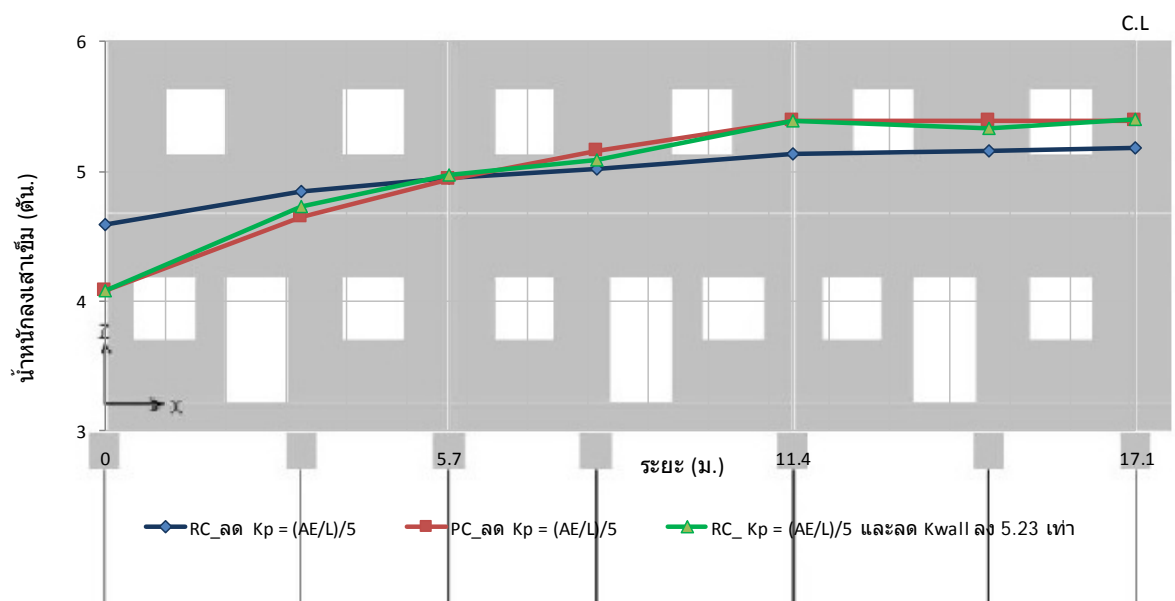
ผลการเปรียบเทียบแรงที่ถ่ายสู่เสาเข็มของผนังด้านหลังแบบหล่อสำเร็จ และแบบหล่อในที่ แสดงในรูปที่ 9, 10 และ 11 สำหรับกรณีที่สติฟเนสของเสาเข็มเท่ากับ 5,000, 2,500 และ 1,000 t/m ตามลำดับ จะเห็นว่าความแตกต่างระหว่างแรงที่ถ่ายลงเสาเข็มต้นริมและต้นกลางของผนังแบบหล่อในที่น้อยกว่าความแตกต่างของผนังหล่อสำเร็จ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสติฟเนสของผนังหล่อในที่ที่มีค่าสูงกว่าของผนังหล่อสำเร็จ ในกรณีที่เสาเข็มมีการขุดตัวเท่ากับ 5,000 t/m เมื่อทำการปรับลดค่าสติฟเนสของผนังหล่อในที่ลง 3.5 เท่า จะให้แรงที่ถ่ายลงเสาเข็มมีขนาดใกล้เคียงกับของผนังหล่อสำเร็จ (ดูรูปที่ 9) ค่าที่ใช้ปรับลดนี้ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเสาเข็มมีค่าขุดตัวมากขึ้น โดยค่าปรับลดมีขนาดเท่ากับ 4.16 และ 5.23 เท่าเมื่อสติฟเนสของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 2,500 และ 1,000 t/m ตามลำดับ (ดูรูปที่ 10 และ 11)



รูปที่ 9. ผลการถ่ายแรงสู่เข็มของผนัง PC เทียบกับผนัง RC ที่ลดสติฟเนสลง 3.5 เท่าและสติฟเนสของเสาเข็มเท่ากับ 5,000 t/m



รูปที่ 10. ผลการถ่ายแรงสู่เข็มของผนัง PC เทียบกับผนัง RC ที่ลดสติฟเนสลง 4.16 เท่าและ สติฟเนสของเสาเข็มเท่ากับ 2,500 t/m



รูปที่ 11. ผลการถ่ายแรงสู่เข็มของผนัง PC เทียบกับผนัง RC ที่ลดสติฟเนสลง 5.23 เท่าและ สติฟเนสของเสาเข็มที่ 1000 t/m



## 6. อธิบายและสรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นในกรณีผนังริม (Line 1 และ 7) และ ผนังกลาง (Line 2 ถึง 6) ซึ่งเป็นผนังสั้น แรงที่ถ่ายลงเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จมีขนาดข้างใกล้เคียงกับแรงในเสาเข็มของผนังหล่อในที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีแรงเสียดทานของ Cement grout ความแตกต่างของแรงในเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จและผนังหล่อในที่ มีค่าไม่เกิน 2% ส่วนกรณีที่มีแรงเฉือนแนวนอนเกิดจาก Shear friction ของเหล็กยื่น DB12 ความแตกต่างของแรงจะไม่เกินประมาณ 3% โดยระยะการเคลื่อนตัวขณะเลื่อนไถลมีผลกระทบต่อแรงในเสาเข็มเพียงเล็กน้อย

ในกรณีผนังด้านหลัง (Line A) ซึ่งเป็นผนังที่ค่อนข้างยาว ความแตกต่างของแรงในเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จกับผนังหล่อในที่จะมีขนาดสูงกว่าของผนังริมและผนังกลาง โดยกรณีที่มีแรงเสียดทานของ Cement grout ความแตกต่างของแรงในเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จและผนังหล่อในที่ มีค่าไม่เกิน 8% ส่วนกรณีที่มีแรงเฉือนเกิดจาก Shear friction ของเหล็กยื่น DB12 ความแตกต่างของแรงจะไม่เกินประมาณ 12% ทั้งนี้ขนาดของความแตกต่างจะสูงขึ้นตามระยะการเคลื่อนตัวขณะเลื่อนไถล

ค่าสติเฟนสของผนังหล่อในที่ มีค่าสูงกว่าของผนังหล่อสำเร็จ ความแตกต่างของสติเฟนสยังขึ้นอยู่กับค่าการยุบตัวของเสาเข็ม ในกรณีที่เสาเข็มมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 5,000, 2,500 และ 1,000  $\mu\text{m}$  ค่าสติเฟนสของผนังหล่อในที่ มีค่าสูงกว่าของผนังหล่อสำเร็จ 3.5, 4.16 และ 5.23 เท่า ตามลำดับ ในทางปฏิบัติแรงที่ถ่ายลงเสาเข็มของผนังหล่อสำเร็จอาจวิเคราะห์โดยจำลองให้เป็นผนังต่อเนื่อง แต่ปรับลดค่าสติเฟนสของผนังลงด้วยค่าที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการยุบตัวของเสาเข็มด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัทพุกกษา โฮลดิ้ง จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

สุริยา ฤทธิจิตเพียร, พิสิทธิ์ ชันติวัฒน์กุล, ชรรมนนุญ สุสำเนา. (2551). *พฤติกรรมโครงสร้างบ้านแบบผนังรับน้ำหนัก*, มหาวิทยาลัยรังสิต,

ACI Committee 318, (2011). *Building Code Requirement for Reinforce Concrete (ACI318-11)*, American Concrete Institute, Detroit.

Warnitchai, P., (2009). *Seismic Acceptance Evaluation of Precast Bearing Wall System*, AIT.

Bowles, J.E., (1997). *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons Inc., Canada.

Flemming, K., Weltman, A., Randolph, M. and Elson, K., (2009). *Pile Engineering*. 3<sup>rd</sup> edition, Taylor & Francis.

Mohamad M.E., Ibrahim, I.S., (2015). Interface shear strength of concrete-to-concrete bond with and without Projecting Steel Reinforcement, *Jurnal Teknologi*, 75-1.